

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0658.2025.41.037

西宁盆地包马庄地区砂岩型铀矿综合地球物理 响应特征及找矿预测

赵旭, 时志浩, 陈斌, 郝昭, 陈擎

(核工业二〇三研究所, 陕西 西安 710086)

[摘要] 西宁盆地新生代地层广泛发育, 具有较好的砂岩型铀成矿地质条件。为研究该区目的层综合地球物理特征, 寻找深部隐伏铀矿体, 文章以目的层下白垩统河口群为研究目标, 综合已有的地质、地球物理资料, 基于活性炭测氦和 CSAMT 测量联合技术手段, 分析区内目的层地质-地球物理特征, 探讨其与铀成矿的相关性, 并进行深部找矿预测。研究表明: 区内氦浓度异常形态能准确地揭示深部铀矿化信息, 稳定的中低阻电性层是目的层砂体发育的电性表现。通过地质-地球物理特征可以更清晰地刻画出区内深部有利含铀砂体的空间展布形态, 对盆地成矿预测、圈定找矿靶区起到重要作用, 为后期勘探施工提供技术参考。

[关键词] 砂岩型铀矿; 西宁盆地; 综合地球物理特征; 找矿预测

[文章编号] 1000-0658 (2025) 03-0523-12 **[中图分类号]** P631 **[文献标识码]** A

近年来, 随着我国持续对绿色清洁核能、国防科工的大力投入, 使得兼备军民两用的铀矿资源需求不断加大(朱鹏飞等, 2018)。伴随着我国铀矿勘探事业的不断发展, 基于铀矿经济开采及保护环境的必要性, 已逐渐形成由南方“硬岩型铀矿”向北方盆地“可地浸砂岩型铀矿”的格局转变(焦养泉等, 2021)。

已发现的砂岩型铀矿主要分布在我国北方中一新生代沉积盆地, 西宁盆地为祁连造山带与西秦岭造山带挤压环境下所形成的断、拗陷交汇的沉积盆地, 地层发育完整, 构造简单, 是重要的煤炭、石油及天然气等资源富集区(陈传诗等, 1987; 张进等, 2009; 孟元林等, 2014)。前人通过对盆地铀成

矿规律的总结和靶区预测, 推动了盆地砂岩型铀矿勘探新突破, 其相应勘探方法与成矿理论研究取得显著成果(荆国强等, 2017; 仲星等, 2018; 徐新文等, 2020; 陈斌等, 2021; 郝昭等, 2021)。

地球物理探测技术能直接或间接地获取地表以下一定深度内的物性特征, 能有效地对在沉积盆地中进行地质找矿提供技术支撑(刘光鼎等, 1985; 袁桂琴等, 2011)。针对地表覆盖层较厚的砂岩型铀矿, 地球物理勘探在查明盆地构造、目的层埋深、砂体发育以及放射性特征与铀成矿关系等方面具有天然的优势(王伟等, 2019; 封志兵等, 2021; 时志浩等, 2022)。然而, 由于浅地表呈现的矿化信息微弱, 且砂岩型铀矿目的层砂体放射性异常与地层结

[基金项目] 中国核工业地质局项目 (编号: 202219、202219-1、202419-2、202319-3 和 202319-7) 联合资助。

[收稿日期] 2024-11-25 **[改回日期]** 2025-02-13

[第一作者] 赵旭 (1990—), 男, 2012年毕业于中国地质大学 (北京), 获学士学位, 工程师, 主要从事铀矿地球物理勘探与方法研究。E-mail: zhao_zxlw@163.com

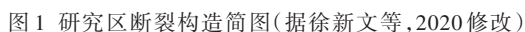
[通信作者] 时志浩 (1994—), 男, 2019年毕业于中国矿业大学 (北京), 获硕士学位, 工程师, 主要从事铀矿地球物理勘探与方法研究。E-mail: shizhihao2671@163.com

[引用格式] 赵旭, 时志浩, 陈斌, 郝昭, 陈擎. 2025. 西宁盆地包马庄地区砂岩型铀矿综合地球物理响应特征及找矿预测[J]. 铀矿地质, 41 (3): 523-534.

Zhao Xu, Shi Zhihao, Chen Bin, Xi Zhao, Chen Qing. 2025. Integrated geophysical response characteristics and prospects prediction for sandstone-type uranium deposit of Baomazhuang area in Xining basin[J]. Uranium Geology, 41 (3): 523-534 (in Chinese with English abstract).

2014;徐新文等,2020;郗昭等,2021)。盆地整体呈现凹凸相间的构造展布特征,受断裂构造控制明显,以北西向断裂构造为主,发育北东向次级大断裂。地层出露齐全,主要为侏罗系、白垩系、古近系、新近系,由南向北埋深变浅,多为平缓单斜地层。西宁盆地自中—新生代以来,经历了印支—西山期的伸展、挤压抬升、挤压拗陷、逆冲推覆等构造运动,侏罗世为盆地的填充补齐期,地层分布较为局限;白垩纪为盆地的大规模沉积阶段,末期受构造作用整体抬升,是区域氧化作用的发育期,经受掀斜和剥蚀作用,在靠近山前或山间凹陷部位的周缘发育有利于砂岩型铀成矿稳定的构造斜坡带。

西宁盆地位于柴达木盆地东南部,地处达坂山南缘断裂(F_4)与拉脊山北缘断裂(F_3)夹持部位,西与日月山毗邻,东南与民和盆地相连,盆山之间为断裂接触,为祁连造山带与西秦岭造山带挤压环境下所形成的断拗相间的中—新生代内陆型沉积盆地(图1)(张进等,2009;孟元林等,



a—西宁盆地构造单元划分; b—研究区构造纲要图

1—逆断层; 2—平移断层; 3—航遥解译隐伏断层; 4—物探解译隐伏断层; 5—背斜; 6—向斜; 7—断裂; 8—砂岩型铀矿点; 9—地名;
10—研究区范围; 11—蚀源区; 12—盆地范围

(K_1hk), 总体为干旱炎热环境下形成的红色碎屑岩建造。河口群组整体以扇三角洲前缘水下分流河道砂体为主, 沉积物颜色主体为棕红色; 基于沉积旋回, 河口群组分为下岩组(K_1hk_1)和上岩组(K_1hk_2), 上岩性组以棕红色、浅棕红色、灰色砾岩、含砾砂岩、中细砂岩与灰色、黄色砂互层, 中、下部

有浅灰色泥灰岩和杂色泥岩,砂体中见有植物碳屑和黄铁矿发育,砂体疏松,泥质胶结;下岩组砂体呈现上粗下细的倒粒序沉积,岩性主要以棕红色砾岩、细砂岩为主,砂泥互层发育,砂体分选性较差,结构疏松,厚度大于 28 m,其粒度较上岩组细。

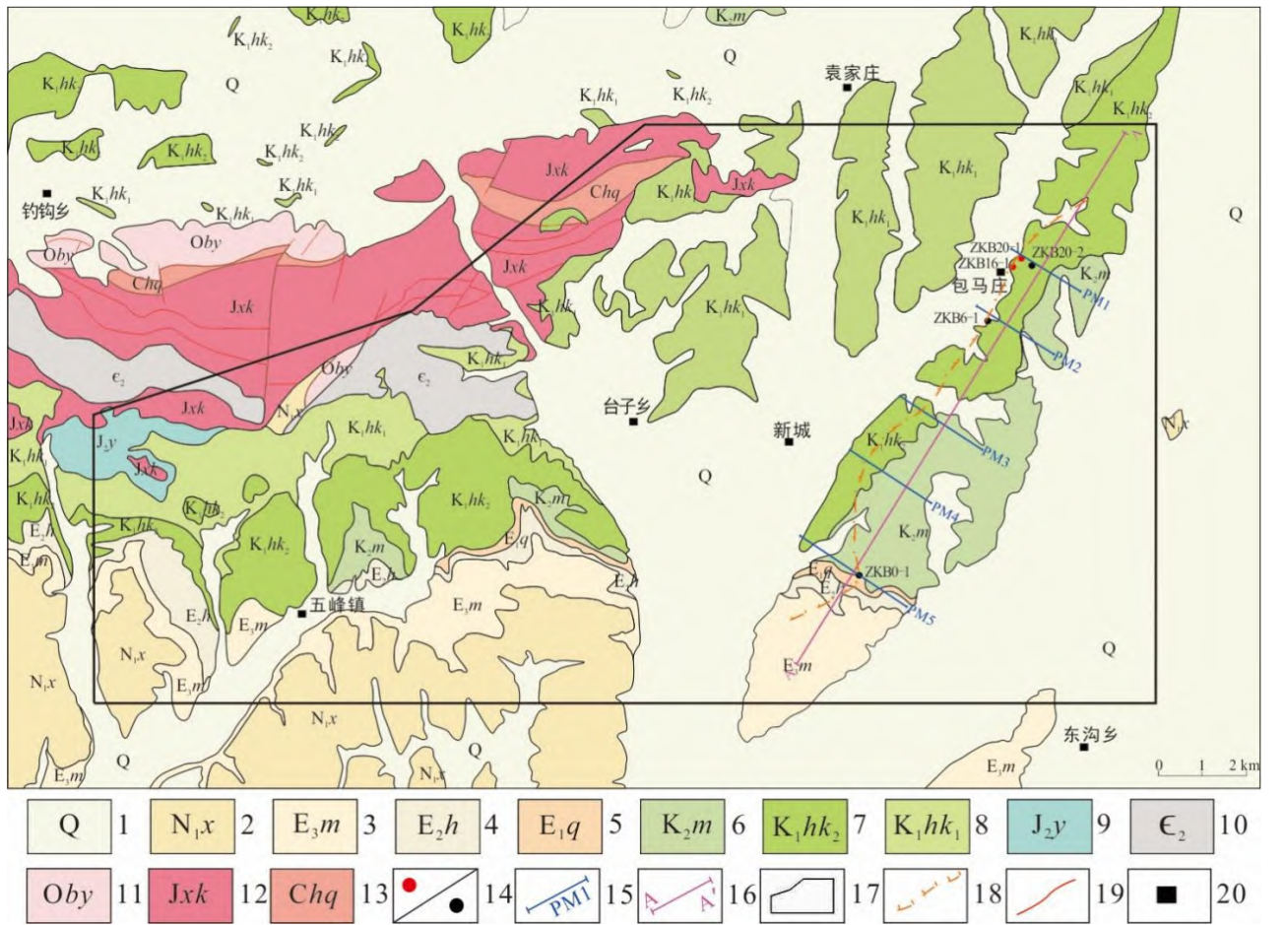


图2 研究区铀矿地质简图(据陈斌等,2021修改)

Fig.2 Sketch uranium geology map of the research area(modified after Chen Bin et al., 2021)

1—第四系; 2—中新统咸水河组; 3—渐新统马哈拉沟组; 4—始新统洪沟组; 5—古新统祁家川组; 6—上白垩统民和组; 7—下白垩统河口群上岩组; 8—下白垩统河口群下岩组; 9—中侏罗统窑街组; 10—中寒武统; 11—青白口系; 12—蓟县系克素尔组; 13—长城系青石坡组; 14—以往铀工业矿孔/本轮施工钻孔; 15—活性炭剖面位置; 16—CSAMT测线位置; 17—研究区; 18—层间氧化带前锋线; 19—推断隐伏断层; 20—居民点

2 探测方法

2.1 活性炭测氡

深部赋存铀矿体衰变产生的氡及其子体属铀系中放射性元素,具较好的迁移特性,易溶于水,在断裂以及裂隙带富集并向上迁移、扩散至地表形成一定范围的“地球化学晕”,以此测量土壤氡气及其子体放射性活度或含量的变化且异常峰值形态,进而查明深部铀矿化信息和隐伏断裂(李必红等, 2005;赵希刚等,2010)。氡及其子体测量主要有瞬时测量和累积测量,本次工作采用累积氡气测量—

活性炭吸附测量法,即利用活性炭强吸附力充分吸附土壤(岩石)中氡及其子体,在规定时间内测量活性炭吸附器中氡衰变过程中释放的伽马射线强度,计算土壤(岩石)中氡浓度值。

为查明研究区不同地层中氡浓度分布特征,推断断裂位置及属性特征,针对区内铀矿化线索,基于地质资料,本次活性炭面测量测线大致垂直于地层、构造线走向或异常带的长轴布置,测线方位 28°。测量点距为 50 m,在目的层、地表铀异常带等有利地段进行加密测量;完成测量 5 条,测点 214 个。

2.2 CSAMT

可控源音频大地电磁法 (CSAMT, Controlled Source Audio-frequency Magnetotelluric) 作为一种频率域电磁测深方法, 采用可控的人工场源, 通过发射不同频率的信号来研究地下地质体的电磁响应, 以此达到探测地下一定深度地质体的电性展布特征及查明地下隐伏的地质构造的目的 (孟凡兴等, 2016; 王浩锋等, 2019; 时志浩等, 2021)。综合研究区以往地质、物探和钻孔测井资料, 对区内出露地层及岩性电阻率进行归纳统计 (表 1)。由表 1 可知, 不同岩性视电阻率有着明显差异, 岩石电阻率与粒

级呈正相关关系, 盆地基底与沉积地层电阻率差异较大, 该电性特征为实施 CSAMT 测量奠定了物性基础。

基于活性炭测氡预测的铀成矿有利区段, 为探究找矿目的层岩性、砂体展布特征, 根据实际情况部署 CSAMT 测量剖面 1 条。采用偶极装置进行标量测量, 发射偶极距 $AB=1.9\text{ km}$, 测量电极距 $MN=100\text{ m}$, 收发距为 10 km , 点距为 100 m (图 1); 高频发射电流为 5 A , 中低频发射电流为 18 A , 采集频段选择 $1\sim 7\,680\text{ Hz}$, 采用多次叠加观测技术以提高信噪比。

表 1 研究区地层 (岩性) 电性参数统计

Table 1 Statistics of electrical parameters of strata (lithology) in the research area

地层	电阻率/ ($\Omega\cdot\text{m}$)		厚度/m	岩性	电阻率/ ($\Omega\cdot\text{m}$)	
	变化范围	平均值			变化范围	平均值
第四系	20~150	45.0	10~15	粉砂质泥岩	11~31	14.92
古一新近系	10.2~40.1	25.12	0~200	粉砂岩	8~40	16.80
上白垩统民和组	15.8~44.7	28.18	0~120	细砂岩	8~44	21.06
下白垩统河口群上岩组	7.8~47.3	24.45	105~251	中砂岩	12~47	23.55
				粗砂岩	13~44	26.66
				含砾粗砂岩	15~77	33.01
下白垩统河口群上岩组	14.0~68.6	44.98	>229	砂砾岩	20~68	35.64
				砾岩	27~69	40.77
三叠系	>70	75.8	未见底			

注: 表中数据依据郝昭等 (2021) 和宋宪生等 (2013^①) 整理

3 综合地球物理特征

3.1 土壤氡浓度特征

氡作为一种放射性元素, 受环境影响具有随机性和变量性, 经迁移、扩散其浓度值表现出分形差异。本次研究主要针对研究区出露地层的氡浓度变化特征, 利用箱式检验法剔除极大值, 基于

(Statistical Product and Service Solutions, SPSS) 软件进行数据处理统计, 进行正态分布检验, 采用算术平均法确定研究区背景值 (\bar{X}) 和标准差 (S) (表 2)。鉴于研究区氡浓度高晕分布面积较大, 梯度变化明显, 综合区内铀矿地质特征, 为整体突出研究区氡浓度异常特征, 因此将本次测量异常阈值按照 5 倍的方差作为异常下限。

表 2 研究区氡浓度异常值

Table 2 Parameter values to classify radon concentration anomalies in the study area

参数	统计值/ ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)
\bar{X}	1 172.9
S	701.4
$\bar{X}+S$	1 874.3
$\bar{X}+2S$	2 575.7
$\bar{X}+3S$	3 277.1
$5S$	5 864.5

统计区内实测剖面土壤氡浓度平均值为 $1\,172.9\text{ Bq/m}^3$, 异常下限为 $5\,864.5\text{ Bq/m}^3$, 异常最

大值为 $28\,880.5\text{ Bq/m}^3$ 。大致查明了区内不同地层氡浓度展布特征 (表 3), 从表 3 中可以看出, 研

究区出露地层氡浓度背景值变化特征显著,其中找矿目的层白垩系砂砾岩(夹泥岩)氡浓度背景值和标准差相对较高,表明研究区地下蕴藏良好的辐射源(体),进一步认定研究区可能存有较好的隐伏铀矿化体,凸显出区内具有较好的铀成矿潜力。

表3 研究区地质体放射性背景值统计表
Table 3 Statistics on background radioactive values of geological bodies in the research area

岩性	样品数/个	氡浓度/(Bq·m ⁻³)	
		背景值	背景值标准偏差
第四系冲积砂土	47	364.6	195.3
新近系砂砾岩	153	1 653.5	1 247.2
白垩系砂砾岩(夹泥岩)	576	2 471.5	1 221.2
古近系泥砂岩	142	1 699.0	1 462.7

通过在研究区开展1:10000活性炭测氡,显示有7个氡浓度异常点(带),异常曲线呈单峰、多峰形态,该氡浓度异常带展布方向与层间氧化带前锋线基本一致(图3)。

区内氡浓度剖面显示发育有明显的铀异常。PM1剖面揭示发育一处铀矿化带(点),带长约100 m,氡浓度最大值为25 270.6 Bq/m³,平均值11 862.2 Bq/m³,异常区段位于下白垩统河口群上岩组第一岩性段(K₁hk₂¹)和第二岩性段(K₁hk₂²)的接触带附近,呈整合面接触,氡异常具体位置在下白垩统河口群上岩组第一岩性段内部,岩性主要以棕红色、红色泥岩夹细砂岩为主,推测为铀成矿有利区段;PM2剖面整体氡浓度值在背景值线上下波动,见有一处异常带(点),氡浓度最高值达28 880.5 Bq/m³,约为异常下限值的5倍,氡浓度偏高段长约100 m,推断由隐伏与第四系下部的下白垩统河口群上岩组第三岩性段(K₁hk₂³)引起,岩性为灰紫色、紫色细砂岩,推测为该剖面的铀成矿有利区段;PM3、PM4剖面氡浓度整体位于异常下限,无铀成矿有利区段。PM5剖面存在2处氡浓度异常,异常最大值为8 413.6 Bq/m³,推断为隐伏断裂引起,赋矿岩性以浅棕红色含砾砂岩为主。

上述活性炭测氡剖面显示,在研究区出露的找矿目的层中见有氡异常,且在局部存在较高氡异常带(点),整体上表现“单高”、“两高夹一低”(李必红等,2005;封志兵等,2021;李彦强等,2022)放射性特征(图4)。需要说明的是,深部赋存铀矿体由中心向两端存在铀镭失衡,首尾两端严重偏镭,氡及其子体测量结果呈现峰值异常,中间部分严重偏铀,致使铀矿体镭量缺失,测量结果表现为低值(刘庆成,2004)。鉴于此,研究区内目标层浅表面所发

育的氡异常带(点)指示其深部铀矿体的放射性特征,氡浓度峰值形态高低夹持部位及外围附近表征深部铀矿体可能的赋存部位以及工业品位。基于活性炭剖面线性展露处的氡异常峰值形态推断有隐伏断裂构造存在,为氡及子体沿裂隙、断裂向上迁移提供有利通道。PM1、PM2剖面氡浓度值最高分别可达25 270.6 Bq/m³、28 880.5 Bq/m³,表明区内氡浓度梯度大,变异系数变化较大。需要说明的是,PM1氡气测量剖面显示氡浓度曲线为单峰异常,呈陡然下降形态,推测为因深部断裂或裂隙带导通形成的氡气浓度异常,且氡气异常附近有铀工业矿孔存在,推测为深部放射性异常产生的氡气异常。故区内氡异常表明深部发育铀矿体,具备一定的成矿潜力。

3.2 电性特征

依据活性炭测氡呈现的找矿目的层放射性特征,表明区内浅地表目的层显示的铀异常点(带)可能表征深部发育含有地质体,且峰值处存在隐伏断裂构造。据此,在活性炭测量圈定的铀成矿有利区内,厘清区内深部目的层埋深、形态及断裂构造的空间展布特征显得尤为重要。故选择典型剖面运用可控源音频大地电磁法研究区内地质体电性特征,预测深部找矿靶区的铀成矿潜力。

L1线呈北东向贯穿于整个研究区,从CSAMT反演电阻率断面图可以看出,整体视电阻率偏低,呈纵向上高低分层、横向电阻率等值线不连续的典型特征(图5)。纵向上由浅入深呈现中高-中低-中-低-中高-高阻的电性特征,横向上浅部电性层电阻率等值线不连续,推断局部地层因剥蚀而缺失;断面顶部电阻率变化范围约为8~40 Ω·m,为相对中低阻层,厚度0~200 m,由南至北逐渐变薄,推

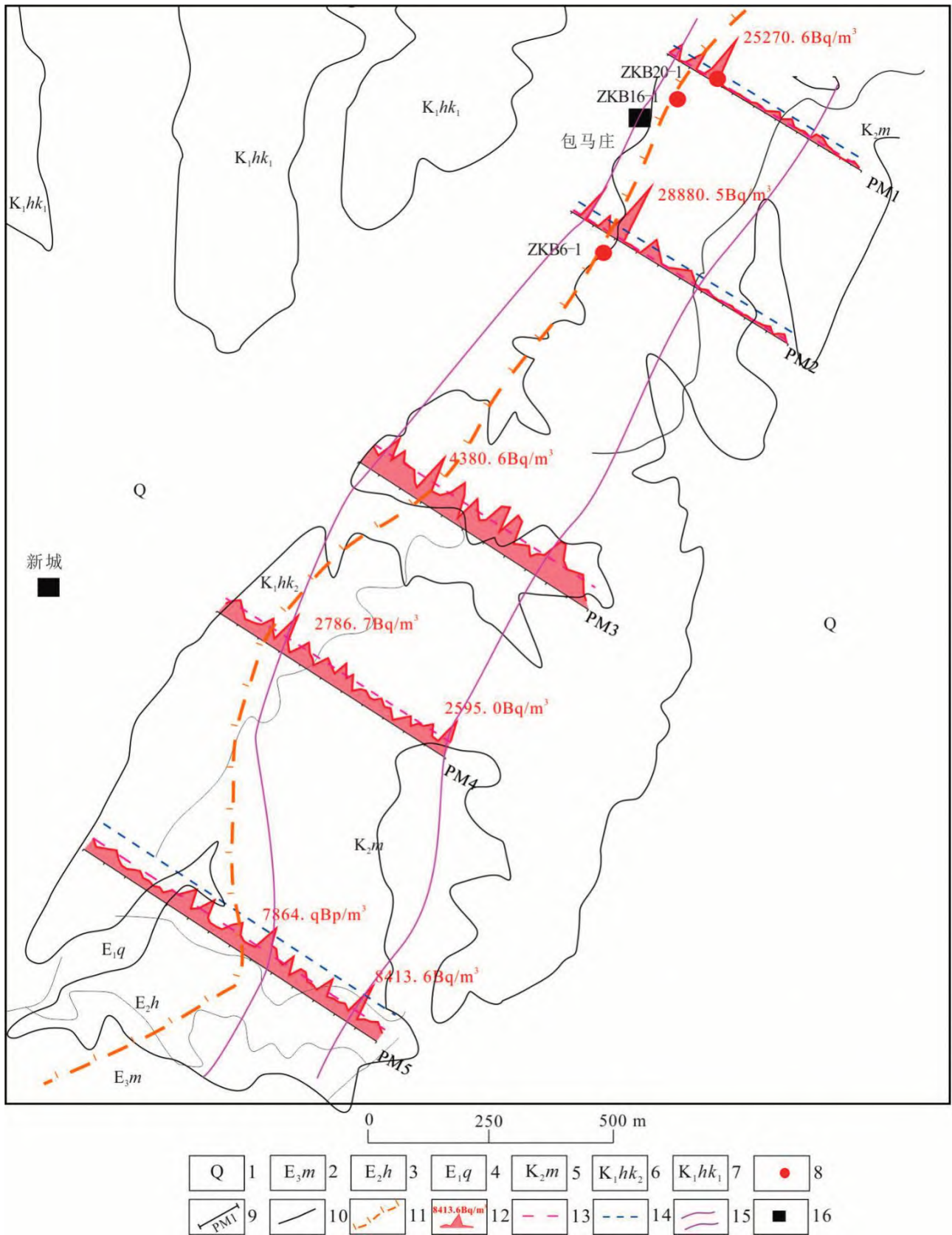


图 3 研究区活性炭测氡剖面图

Fig. 3 Measured profiles of activated carbon radon in the research area

1—第四系；2—渐新统马哈拉组；3—始新统洪沟组；4—古新统祁家川组；5—上白垩统民和组；6—下白垩统河口群上岩组；7—下白垩统河口群下岩组；8—铀工业矿孔；9—活性炭测氡剖面；10—地层界线；11—层间氧化带前锋线；12—氡浓度曲线；13—氡浓度曲线背景值界线；14—氡浓度曲线异常下限；15—推测有利区段；16—居民点

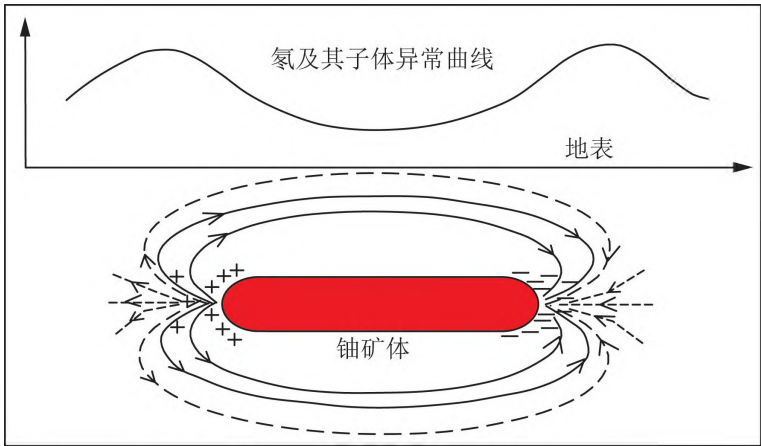


图4 水平铀矿体氡异常形成机理

Fig. 4 Mechanism of radon anomaly formation in horizontal uranium ore bodies

测为古近系地层,岩性以泥岩和砂岩为主;在断面顶部常见有团块状相对中高阻体,电阻率变化范围为20~70 Ω·m,推测为第四系冲洪积物;第三电性层分布于平距2.2~2.7 m处,电阻率变化范围15~50 Ω·m,为中电阻率层,具南深北浅特征,厚度0~180 m不均匀展布,推测为上白垩统民和组砂岩;断面中部反演电阻率5~35 Ω·m,表现为中低阻特征,推测为下白垩统河口群上岩组砂岩,局部电阻率低推测为泥岩夹层,自西南向东北方向厚度逐渐减

薄,至断面中北段出露地表;其平距2~14.5 km段,反演电阻率15~35 Ω·m,上下被低阻电性层夹持,等值线呈似层状展布,推测为河口群上岩组古河道砂体。断面底部电阻率变化范围为20~70 Ω·m,分布于平距6.1~14.5 km段,为相对中高阻层,沉积厚度较大,推测为河口群下岩组砾岩、含砾砂岩、砂岩;其平距12.3~14.5 km处,电阻率变化范围大于70 Ω·m,为相对高层,自西南向东北快速增大,推断为基底。

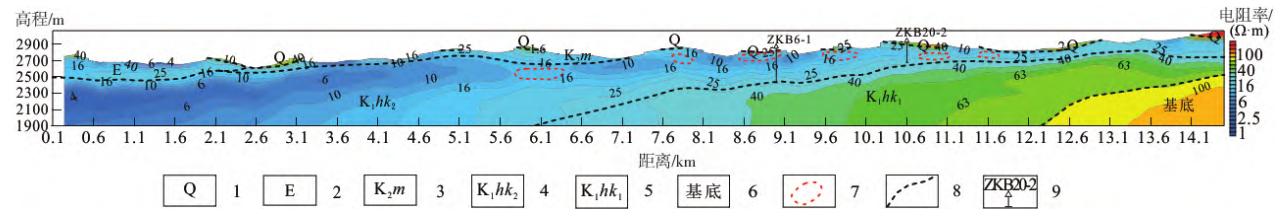


图5 包马庄地区A—A'线CSAMT反演电阻率断面及地质解释图

Fig. 5 Resistivity inversion profile of CSAMT measurement Line A—A' and interpreted geological cross-section in Baomazhuang area

1—第四系; 2—古近系; 3—上白垩统民和组; 4—下白垩统河口群上岩组; 5—下白垩统河口群下岩组; 6—中元古代、新元古代及早古生代基底; 7—推断砂体; 8—推断泥岩; 9—地层界线; 10—钻孔及编号

综上所述,研究区内找矿目的层河口群上下岩组主要发育于断面的中上部,呈单斜状展布,岩性粒度下粗上细,埋深较浅,推断在平距6~12.1 km处发育较好的砂体,砂体以砂岩、含砾砂岩为主,连通性较好,一般呈似层状展布,推测为研究区内寻找砂岩型铀成矿的有利部位。

4 找矿预测

4.1 成矿预测

研究区地处西宁盆地,蚀源区广泛发育前中生代富铀建造、富铀侵入体,且其中活动铀占比30%左

右,岩石铀含量普遍较高 $(3.5\sim6.7)\times10^{-6}$,且Th/U值为3.2~5.2,表现为富钍贫铀,Th/U>3,铀迁出明显,表明蚀源区富铀岩体中的铀元素被活化、浸出,在含铀含氧水的运移过程中,可为盆地砂岩型铀成矿提供丰富的铀源。盆内沉积盖层中中侏罗系铀含量较高 $(2.6\sim200)\times10^{-6}$,形成找矿目的层的衍生铀源层;同时区内找矿目标层灰色砂岩与上覆红色砂岩铀含量相对偏高,且在后期氧化淋滤改造过程中易产生活化铀,亦可为区内目的层提供铀源。

显而易见,区内丰富的铀源供给致使研究区地

表出露地层具有较强的氡浓度强度。活性炭测氡剖面显示,地表土壤氡浓度异常发育,依据氡浓度异常曲线形态(单峰异常、多峰异常)推测主要受地层和隐伏断裂构造的控制,圈出氡浓度异常点4个,成带性明显,推测区内铀成矿有利区范围较大;土壤氡气剖面形态呈“两高夹一低”异常特征,且PM1、PM2剖面氡浓度值最高分别可达25 270.6 Bq/m³、28 880.5 Bq/m³,表明研究区内底部氡气量充足,推断其为来自于深部铀矿体产生的氡气通过断裂及裂隙带导通向上迁徙、扩散所致,汇聚至浅地表形成一定范围的氡气异常点(带)。

研究区找矿目的层以发育灰色、灰黑色碎屑岩建造为主,分布广泛,泥-砂-泥结构清晰,发育有较好的构造斜坡带。据电性剖面结果显示,由盆地中心位置至边缘,电性特征较为稳定,结构整体以单斜形态展布;垂向上呈中高-中低-中-低-中高-高

阻的电性反映,基底具西南深、东北浅的特征,断面东北端地层表现出再次明显抬升的现象,因此,区内基底凸起或凹陷对沉积地层产生一定的破坏。由电性剖面特征进一步看出,研究区目的层下白垩统河口群组(铀矿化)地处斜坡带,是砂岩型铀矿氧化—还原过渡带的发育地段。

4.2 钻探查证

依据活性炭测氡和CSAMT测量显示,研究区浅地表氡浓度曲线呈现单峰、双峰形态,相对应的CSAMT电性剖面呈现电阻率等值线变化平稳且在底部有着明显的中低阻电性层(图6)。因此,借助于土壤氡测量中蕴含的放射性异常信息和CSAMT对于研究区目的层砂体展布特征的推断,在以后的工作中,可以在研究区地表土壤氡气异常点(带)部位以及对应于深部稳定的中低阻电性层布设钻孔来探索更好的铀矿化线索。

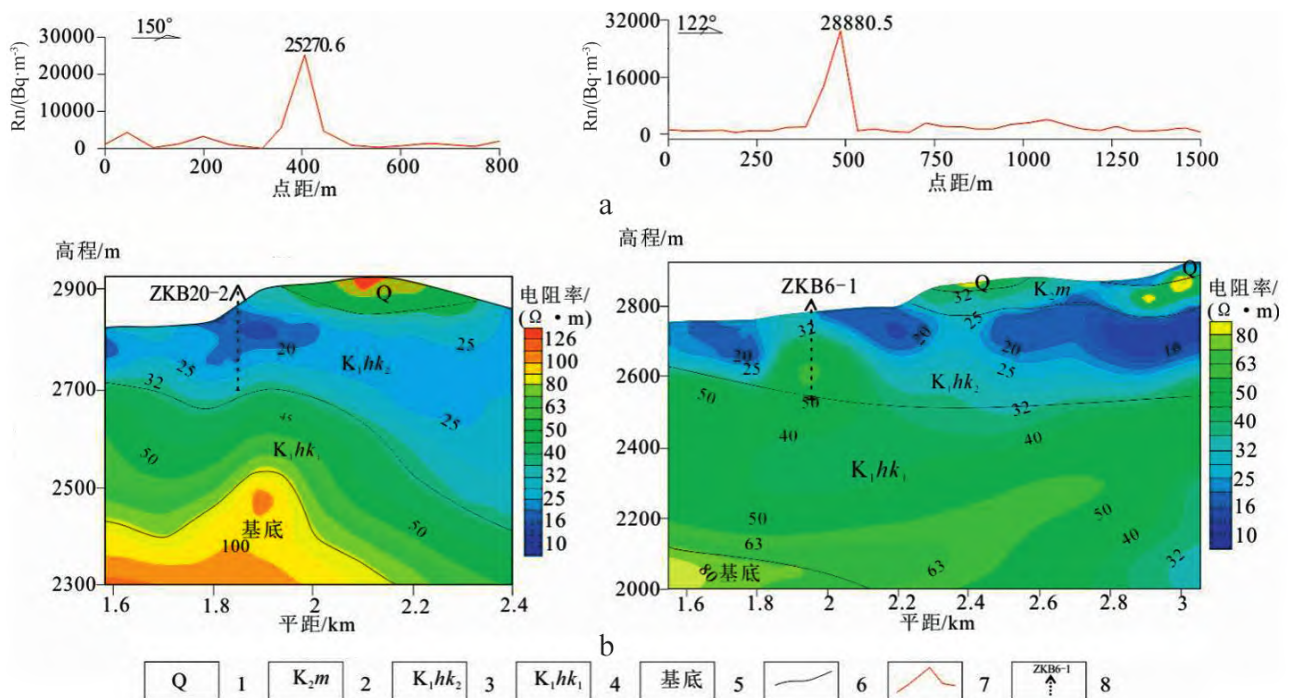


图6 研究区CSAMT反演电阻率与土壤氡气剖面图

Fig. 6 CSAMT inverse resistivity and soil radon profile in the study area

a—土壤氡剖面测量; b—CSAMT电阻率剖面测量

1—第四系; 2—上白垩统民和组; 3—下白垩统河口群上岩组; 4—下白垩统河口群下岩组; 5—中元古代、新元古代及早古生代基底; 6—推断地质界线; 7—氡气测量曲线; 8—预布设钻孔

为验证电法和测氡方法的效果,在土壤氡浓度异常位置去布置钻孔,共布置3个(图2)。经钻孔揭露,发现工业孔1个、矿化孔1个,无矿孔1个,铀矿化层位于上白垩统河口群上岩组第二岩

性段,赋矿岩性为疏松灰色、褐黄色、棕红色细—粗砂岩,受层间氧化带控制。钻孔揭露显示,研究区找矿目的层河口群上下岩组共计发育砂体3~11层,平均厚度21 m,以中细砂岩、含砾粗砂

岩为主,其砂体发育位置与CSAMT反演断面图推测可能的砂体分布范围大致吻合(图5)。其中工业孔ZKB6-1见有1层工业铀矿体、4层铀矿化,工作铀矿段14.20~17.80 m,岩性为疏松浅黄色粗砂岩,厚度3.6 m,品位0.022 8%,平米铀量1.78 kg/m²(图7)。第一层矿化段27.35~27.95 m,岩性为棕红色含砾粗砂岩,厚度0.6 m,品位0.007 3%,平米铀量0.1 kg/m²;第二层35.35~36.35 m,岩性为灰色泥

岩,厚度1.0 m,品位0.006 8%,平米铀量0.15 kg/m²;第三层60.45~60.95 m,岩性为灰色中砂岩,厚度0.5 m,品位0.008 5%,平米铀量0.09 kg/m²;第四层260.80~260.90 m,岩性为棕红色粗砂岩,厚度0.1 m,品位0.005 7%,平米铀量0.01 kg/m²。;铀矿化孔ZKB20-2在71.15~125.70 m见有2层铀矿化,矿化体厚度0.20~0.30 m,品位0.005 2~0.014 9%,平米铀量0.02~0.10 kg/m²。

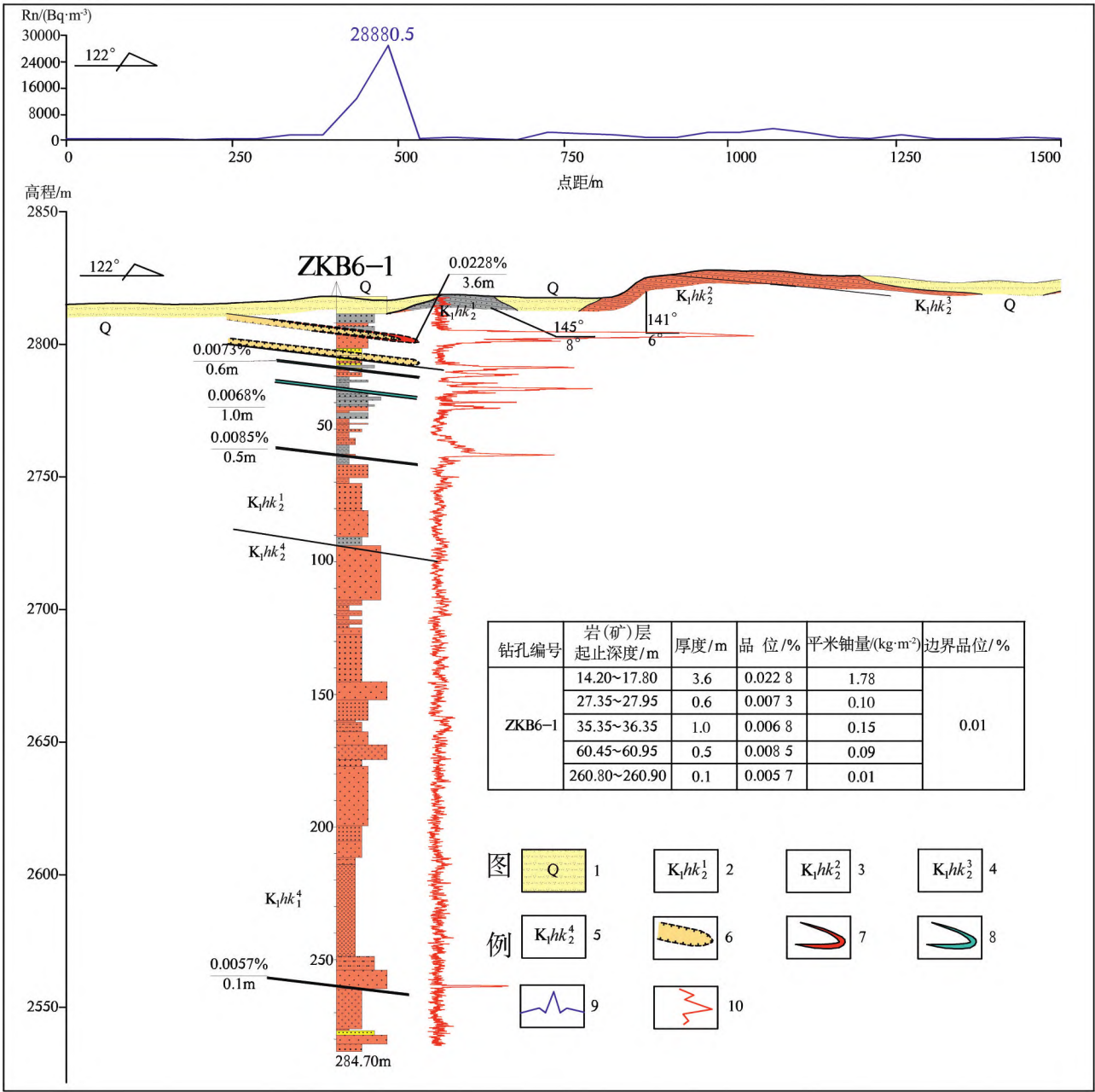


图7 研究区B6勘探线地质剖面图

Fig. 7 Geological profile of exploration Line B6 in the study area

1—第四系; 2—下白垩统河口群上岩组第一岩性段; 3—下白垩统河口群上岩组第二岩性段; 4—下白垩统河口群上岩组第三岩性段; 5—下白垩统河口群下岩组第四岩性段; 6—层间氧化带; 7—工业铀矿体; 8—铀矿化体; 9—氡浓度异常曲线; 10—定量伽马测井曲线

钻探结果证实研究区地表氦浓度异常显示深部具有较好的铀矿化存在,砂体厚度、位置与 CSAMT 推测较为吻合,表明研究区具有较好的铀矿化线索,显示有良好的砂岩型铀成矿潜力。在以后的勘查工作中,可以在研究区氦浓度异常和深部呈中低阻电性层范围内布设钻孔,以此探索更好的铀矿化线索。总而言之,CSAMT 和氦气测量在沉积盆地砂岩型铀矿找矿中具有一定的找矿效果。

5 结论

1)通过综合地球物理方法分析,西宁盆地包马庄地区下白垩统河口群上岩组砂体发育稳定的中低阻电性层,结合氦浓度异常的空间展布特征,首次揭示该区深部铀矿化主要赋存于层间氧化带前锋线与隐伏断裂构造交汇部位,且砂体呈透镜状展布于构造斜坡带,为区内砂岩型铀矿富集的关键控矿要素。

2)蚀源区供铀丰富,且具备迁出量,研究区内发现多处“双峰”土壤,氦浓度异常及低阻电性特征的区域为铀成矿有利地段。

3)活性炭测氦与 CSAMT 联合探测表明研究区氦异常带与中低阻砂体空间耦合性显著,精准刻画了河口群砂体垂向分带(上细下粗)与横向连通性特征,钻探查验证实二者协同可有效圈定深部铀成矿靶区,为西宁盆地北缘隐伏砂岩型铀矿勘查提供了“氦异常-电性结构-构造控矿”三位一体的综合预测模型。

[注释]

- ① 宋宪生,荆国强,李卫. 2013. 青海省西宁-化隆盆地砂岩型铀资源调查评价报告[R]. 咸阳:核工业二〇三研究所.

[参考文献/References]

陈斌,康利刚,李强. 2021. 西宁盆地北缘白垩系砂岩型铀矿成矿条件及找矿前景分析[J]. 铀矿地质, 37(4): 614-623.

陈传诗,曹运兴. 1987. 西宁盆地煤成气远景预测[J]. 煤田地质与勘探, (2): 33-36.

封志兵,聂冰峰,聂逢君,江丽,夏菲,李满根,严兆彬,何剑峰,程若丹. 2021. 地球物理方法在砂岩型铀矿勘查中的应用进展[J]. 物探与化探, 45(5): 1179-1188.

焦养泉,吴立群,荣辉,张帆. 2021. 中国盆地铀资源概述[J].

地球科学, 46(8): 2675-2696.

荆国强,宋宪生,李磊. 2017. 西宁盆地砂岩型铀矿成矿地质特征分析[J]. 世界核地质科学, 34(2): 70-79.

李必红,刘庆成,邓居智. 2005. 氦及其子体测量在东胜砂岩铀矿勘查中的应用[J]. 物探与化探, (6): 519-522.

李彦强,白强,戴佳文,张彬,郭宝,袁兴民. 2022. 青海省五道梁地区铀异常特征与成因分析[J]. 科学技术与工程, 22(15): 5997-6004.

刘光鼎,肖一鸣. 1985. 油气沉积盆地的综合地球物理研究[J]. 石油地球物理勘探, (5): 445-454.

刘庆成. 2004. 铀矿地面物化探的发展与应用[J]. 世界核地质科学, 21(1): 38-45.

孟凡兴,乔勇,胡鉴,黄宝峰,梁永顺,冯春园. 2016. 可控源音频大地电磁测量在花岗岩型铀矿勘查中的应用[J]. 物探与化探, 40(3): 488-492, 513.

孟元林,杜虹宝,许丞,肖丽华,周新桂,胡安文. 2014. 西宁盆地地下侏罗统烃源岩有机地球化学特征[J]. 天然气地球科学, 25(4): 588-594.

时志浩,陈擎,叶雷刚,陈斌,康利刚,邵恒博,王继斌,张未,白强. 2022. 柴达木盆地西缘砂岩型铀矿目标层地球物理响应特征[J]. 地质与勘探, 58(2): 258-273.

时志浩,叶雷刚,陈擎,贺建国,杜亚龙. 2021. 综合物探方法在柴达木盆地北缘查香卡地区铀矿勘查中的应用[J]. 铀矿地质, 37(6): 1101-1111.

王浩锋,刘波,陈霜,陈凤兴,薛文浩. 2019. 综合物探测量在二连盆地沉积岩型铀矿勘查中应用[J]. 地质与勘探, 55(1): 127-134.

王伟,黄玉龙,刘波,秦彦伟,颜小波,董续舒,郝朋. 2019. CSAMT 与土壤氦气测量在砂岩型铀矿勘查中的应用: 以内蒙古巴音杭盖地区为例[J]. 地质与勘探, 55(5): 1241-1249.

郝昭,吕杰. 2021. CSAMT 法在西宁盆地包马庄地区砂岩型铀矿勘查中的应用[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 44(5): 472-480.

徐新文,段建华,路耀祖,刘江峰,徐加球,杨晓鸿. 2020. 西宁盆地砂岩型铀矿地质特征及找矿方向[J]. 地质找矿论丛, 35(1): 15-24.

袁桂琴,熊盛青,孟庆敏,周锡华,林品荣,王书民,高文利,徐明才,史大年,李秋生. 2011. 地球物理勘查技术与应用研究[J]. 地质学报, 85(11): 1744-1805.

张进,马宗晋,李智敏,李文巧. 2009. 从西宁盆地新生代变形探讨青藏高原东北缘的变形特征[J]. 地质论评, 55(4): 457-472.

赵希刚,张云宜,赵翠萍,贺建国. 2010. 砂岩型铀矿找矿中物化探测量方法应用评述及建议[J]. 世界核地质科学, 27(1): 31-36.

仲星,李娟,高云. 2018. 西宁盆地砂岩型铀成矿条件与找矿

- 方向[J]. 矿产与地质, 32(3): 423-426.
- 朱鹏飞, 蔡煜琦, 郭庆银, 刘武生, 李建红, 张明林, 漆富成, 张宇龙, 贾立城, 徐浩. 2018. 中国铀矿资源成矿地质特征与资源潜力分析[J]. 地学前缘, 25(3): 148-158.
- Chen Bin, Kang Ligang, Li Qiang. 2021. Ore-forming conditions and prospecting potential of Cretaceous sandstone-type uranium deposits in the north margin of Xining basin [J]. Uranium Geology, 37 (4) : 614-623 (in Chinese with English abstract).
- Chen Chuanshi, CAO Yunxing. 1987. Long-term prediction of coal-to-gas in Xining basin [J]. Coal Geology and Exploration, (2): 33-36 (in Chinese with English abstract).
- Feng Zhibing, Nie Bingfeng, Nie Fengjun, Jiang Li, Xia Fei, Li Mangen, Yan Zhaobin, He Jianfeng, Cheng Ruodan. 2021. Application progress of geophysical methods in exploration of sandstone-type uranium deposit [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 45 (5) : 1179-1188 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Yangquan, Wu Liqun, Rong Hui, Zhang Fan. 2021. Review of basin uranium resources in China [J]. Earth Science, 46 (8): 2675-2696 (in Chinese with English abstract).
- Jing Guoqiang, Song Xiansheng, Li Lei. 2017. Analysis on metallogenic geological characteristics of sandstone-type uranium deposit in Xining basin [J]. World Nuclear Geoscience, 34(2): 70-79 (in Chinese with English abstract).
- Li Bihong, Liu Qingcheng, Deng Juzhi. 2005. The application of radon and its daughters to the exploration of sandstone type uranium deposits in Dongsheng area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, (6) : 519-522 (in Chinese with English abstract).
- Li Yanqiang, Bai Qiang, Dai Jiawen, Zhang Bin, Guo Bao, Yuan Xingmin. 2022. Analysis of characteristics and cause of uranium anomalies in Wudaoliang area, Qinghai province [J]. Science Technology and Engineering, 22 (15) : 5997-6004 (in Chinese with English abstract).
- Liu Guangding, Xiao Yiming. 1985. Integrated geophysical study of hydrocarbon sedimentary basins [J]. Oil Geophysical Exploration, (5) : 445-454 (in Chinese with English abstract).
- Liu Qingcheng. 2004. Technology development of uranium geophysical and geochemical exploration and its application [J]. World Nuclear Geoscience, 21(1) : 38-45 (in Chinese with English abstract).
- Meng Fanxing, Qiao Yong, Hu Jian, Huang Baofeng, Liang Yongshun, Feng Chunyuan. 2016. The applications of CSAMT to the exploration of granite type uranium deposits [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 40 (3) : 488-492, 513 (in Chinese with English abstract).
- Meng Yuanlin, Du Hongbao, Xu Cheng, Xiao Lihua, Zhou Xingui, Hu Anwen. 2014. Organic geochemistry of Lower Jurassic source rocks in Xining basin [J]. Natural Gas Geoscience, 25 (4) : 588-594 (in Chinese with English abstract).
- Shi Zhihao, Chen Qing, Ye Leigang, Chen Bin, Kang Ligang, Shao Hengbo, Wang Jibin, Zhang Wei, Bai Qiang. 2022. Geophysical response characteristics of the target layer of sandstone-type uranium deposits in the western depression of Qaidam basin [J]. Geology and Exploration, 58(2) : 258-273 (in Chinese with English abstract).
- Shi Zhihao, Ye Leigang, Chen Qing, He Jianguo, Du Yalong. 2021. Application of comprehensive geophysical prospecting methods to uranium exploration in Chachaxiangka area, northern Qaidam basin [J]. Uranium Geology, 37(6) : 1101-1111 (in Chinese with English abstract).
- Wang Haofeng, Liu Bo, Chen Shuang, Chen Fengxing, Xue Wenhao. 2019. Application of integrated geophysical surveys to exploration of sedimentary rock type uranium in the Erlian basin [J]. Geology and Exploration, 55(1) : 127-134 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wei, Huang Yulong, Liu Bo, Qin Yanwei, Yan Xiaobo, Dong Xushu, Hao Peng. 2019. Application of the CSAMT method and soil radon measurement in surveys for sandstone-type uranium deposits: An example of the Bayinhanggai area, Inner Mongolia [J]. Geology and Exploration, 55(5) : 1241-1249 (in Chinese with English abstract).
- Xi Zhao, Lyu Jie. 2021. Application of CSAMT method for sandstone type uranium deposits prospecting in Baomazhuang area of Xining basin [J]. Journal of east China university of technology (natural science), 44(5) : 472-480 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xinwen, Duan Jianhua, Lu Yaozu, Liu Jiangfeng, Xu Jiaqiu, Yang Xiaohong. 2020. Geological characteristics and prospecting direction of sandstone type uranium deposit in Xining basin [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 35(1) : 15-24 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Guiqin, Xiong Shengqing, Meng Qingmin, Zhou Xihua, Lin Pinrong, Wang Shumin, Gao Wenli, Xu Mingcai, Shi Danian, Li Qiusheng. 2011. Application research of geophysical prospecting techniques [J]. Acta Geologica Sinica, 85(11) : 1744-1805 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jin, Ma Zongjin, Li Zhimin, Li Wenqiao. 2009. Study on deformational characteristics of northeastern Qinghai-Xizang (Tibetan) plateau from Late Cenozoic deformation in the Xining basin [J]. Geological Review, 55(4) : 457-472 (in Chinese with English abstract).

- Zhao Xigang, Zhang Yunyi, Zhao Cuiping, He Jianguo. 2010. Application review and proposition of geophysical and geochemical exploration in sandstone-type uranium deposit [J]. *World Nuclear Geoscience*, 27(1): 31–36 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Pengfei, Cai Yuqi, Guo Qingyin, Liu Wusheng, Li Jianhong, Zhang Minglin, Qi Fucheng, Zhang Zilong, Jia Licheng, Xu Hao. 2018. Metallogenetic and geological characterization and resource potential assessment of uranium resources in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 25(3): 148–158 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Xing, Li Juan, Gao Yun. 2018. Ore forming conditions and prospecting direction of sandstone type uranium deposits in Xining basin [J]. *Mineral Resources and Geology*, 32(3): 423–426 (in Chinese with English abstract).

Integrated Geophysical Response Characteristics and Prospects Prediction for Sandstone-type Uranium Deposit of Baomazhuang Area in Xining Basin

ZHAO Xu, SHI Zhihao, CHEN Bin, XI Zhao, CHEN Qing

(*Nuclear Industry Institute No.203, Xi'an, Shaanxi 710086, China*)

Abstract: Cenozoic strata are widely developed in Xining basin, which provides beneficial geological condition for sandstone-type uranium mineralization. To study geophysical characteristic of target layer and locate the deep buried uranium ore bodies, this article focus on Early Cretaceous Hekou Group. Based on the collected geological and geophysical data, we analyzed geology-geophysics features of target layer with activated carbon measurement and CSAMT method, to study how these features affect uranium deposition and serve the forecast of prospect. The result shows that abnormal of radon concentration can reveal the uranium mineralization in deep buried sandstone bodies with the moderate or low resistivity layer indicator. Combining the geological and geophysical features, we can depict the space shape of favorable uranium-bearing sandstone bodies, which contribute to forecast and delineate prospecting target area and provide references for drill hole verification.

Keywords: sandstone-type uranium deposit; Xining basin; integrated geophysical characteristics; prospect prediction